사륜 조향 시스템을 통한 횡 차량 거동 향상의 제약 최적화 기반 분석

Constrained Optimization-Based Performance Improvement Analysis of Vehicle Lateral Control Using All-Wheel Steering

○유 명 석 [1], 최 경 환 [1*]
[1)] 한국과학기술원 조천식모빌리티대학원 (TEL: 010-9953-6538; E-mail: dding_98@kaist.ac.kr)
[1)] 한국과학기술원 조천식모빌리티대학원 (TEL: 042-350-1765; E-mail: kh.choi@kaist.ac.kr)

Abstract This paper investigates the effectiveness of all-wheel steering (AWS) through numerical analysis based on constrained optimization. AWS is known to improve low-speed maneuverability by steering in the opposite direction to the front wheels and to enhance high-speed stability by steering in the same direction. To quantify these benefits, two constrained optimization problems are formulated under safety-related constraints, including sideslip angle, lateral acceleration and tire non-slip conditions. The first problem determines the maximum allowable yaw rate over a range of longitudinal velocities and front steering angles, while second determines the minimum achievable sideslip angle for a given yaw rate condition under the same constraints. The results shows that RWS enlarges the feasible operating region in terms of longitudinal velocity and front steering angle, increases the allowable yaw rate and significantly reduces the sideslip angle.

Keywords All-wheel steering, Vehicle lateral control, Constrained optimization

1. 서론

전통적인 횡 방향 차량 동역학 제어의 목적은 전륜 조향을 통해, 목표 yawrate를 생성하여 거동 민첩성을 개선하거나 sideslip angle의 크기를 줄여 안정성을 높이는 것을 목표로 한다. 하지만 전륜 조향 하나 만으로는 두가지 목표를 달성하기에 한계가 있다 [1].

이를 개선하기 위하여 후륜 조향을 추가 활용한 사륜 조향(all-wheel steering)이 개발되어 왔다. 여러 가지 형태의 제어 방법이 제시되어 왔으며 거동 향상의 효과를 보여왔다. 그 예로, 가장 단순한 전륜각에 대한 비례제어와 위상지연 제어, 모델기반 예측제어가 있다.

이 논문에서는 안전한 영역 내에서 사륜 조향이 차량 거동 향상을 얼마나 향상 시킬 수 있는지에 대한 분석을 제약 최적화를 통하여 제시한다. 안전한 영역은 sideslip angle 과 횡 가속도의 크기에 대한 제한과 슬립나지 않는 선형 타이어 영역에 대한 제약조건을 부여하여 고려하였다.

2. 제약 최적화 문제 정의

분석을 위해 사용된 최적화 문제들은 아래와 같이 정의된다.

$$\max r^2 \ (Problem\ 1), \min \beta^2 \ (Problem\ 2)$$

$$\text{subject to } \dot{\beta} = 0, \dot{r} = 0,$$
$$|A_y| \le 0.8G, |\beta| \le 3\ deg,$$
$$C_y = C_y(A_y), |\alpha| \le \overline{\alpha}(A_y)$$
$$r = 10 deg/s \ \text{(for problem 2)}.$$

각 기호는 yaw rate 와 sideslip angle, 횡 가속도를 의미하는 r과 β, A_y와 선형 횡 타이어 계수와 타이어 슬립각을 의미하는 C_y 와 α가 있다. 또한 각 타이어 계수와 횡 력은 바퀴의 수직력에 대한 비선형 함수이며 정역학을 이용하여 횡 가속도로부터 수직력이 구해진다.

첫번째 문제는 제약조건 내에서 생성 가능한 최대 yaw rate 를 찾는 문제이고 두번째 문제는 10 deg/s 를 생성 가능한 최저 sideslip angle 을 찾는 문제이다.

사용된 차량 물성은 질량 2479 kg 과 yaw 관성 모멘트 5676.82 kg·m^2, 무게 중심으로부터 전후륜까지의 거리 1.5876 m 와 , 1.5524 m, 좌우륜 거리 1.62 m 이다. 타이어 모델은 전륜은 245/45R19, 후륜은 275/40R19 이며 공기압은 241 kPa 이다. 선형 구간은 원점에서 기울기에 대하여 5%까지 구간으로 선정하였으며 그림 1 에 묘사되어 있다.

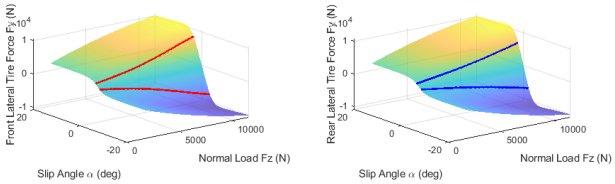

그림 1. 전륜(좌측)과 후륜(우측) 타이어 모델.

3. 최적화 결과 분석

3.1 생성 가능한 최대 yaw rate

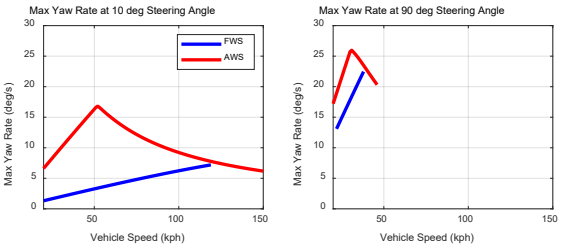

그림 2. 조향각 별 생성 가능한 최대 yaw rate.

두가지 전륜 조향각에 대하여 분석하였다. 먼저 그림 2의 좌측 그림을 보면 운전대를 10 deg 돌렸을 때 전륜 조향의 경우 120 kph 이상에서 안전 제약조건을 만족시킬 수 없다는 것을 볼 수 있다. 하지만 사륜 조향의 경우 150 kph까지의 전 구간에 대하여 안전 제약 조건을 만족하였고, 표 1에서 볼 수 있듯이 최대 생성 가능 yaw rate를 49% 향상 시켰다.

그림 2의 우측 그림의 경우 운전대를 90 deg 돌렸을 때의 결과로 10 deg의 경우와 마찬가지로 더 넓은 속도 범위에서 안정 제약조건을 만족시키며 표 1에서 보이듯 16%의 성능 개선을 보였다. 중간 조향 정도인 45 deg의 경우의 성능 향상은 36% 정도로 표 1에서 확인할 수 있다.

표 1. 사륜 조향을 통한 최대 yaw rate 개선량

	전륜 조향	사륜 조향	개선량
10 deg	6.75 deg/s	16.80 deg/s	+49 %
45 deg	15.87 deg/s	21.55 deg/s	+36 %
90 deg	22.47 deg/s	25.97 deg/s	+16 %

3.2 감소 가능한 sideslip angle (yawrate 10deg/s 기준)

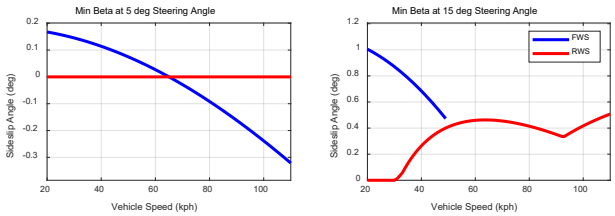

그림 3. 10 deg/s yaw rate를 생성하는 최저 sideslip angle.

다음으로, 10 deg/s의 yaw rate를 생성하는 sideslip angle을 줄이는 성능을 분석하였다. 그림 3의 좌측에 보이는 것과 같이 작은 운전대 각도(5 deg)의 경우 모든 구간에서 사륜 조향은 sideslip angle을 0 deg로 줄일 수 있음을 보인다. 반면 운전대 각도가 증가하는 경우 그림 3의 우측에서 보이는 것과 같이 30 kph까지만 사륜 조향이 0 deg로 줄일 수 있는 것을 볼 수 있다. 그 이후 최저 sideslip angle이 증가하지만 여전히 전륜 조향의 경우보다 더 작다. 추가로 50kph이상에는 전륜 조향은 더이상 안전 제약조건을 만족시키지 못하지만 사륜 조향을 통해서는 모든 속도 구간에 대하여 만족시킬 수 있었다.

※ 본 연구는 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었으며, 해당 재원은 대한민국 정부(과학기술정보통신부, MSIT)의 재원으로 지원되었다(RS-202500554087).

4. 결론

본 논문은 제약 최적화를 통하여 사륜 조향의 차량 횡 거동 개선의 효과를 분석한다. 사륜 조향을 통해 향상 시킬 수 있는 최대 yaw rate 와 주어진 yaw rate에 대하여 줄일 수 있는 최저 sideslip angle을 구하였다. 이를 통하여 사륜 조향을 통해 기대할 수 있는 효과에 더불어 추후 제어기 설계의 지령에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

[1] R. Rajamani, Vehicle dynamics and control, 2nd ed., ser. Mechanical Engineering Series. New York, NY: Springer, Dec. 2012

[2] L. Bredthauer and D. Lynch, “Use of active rear steering to achieve desired vehicle transient lateral dynamics,” presented at the WCX World Congress Experience, Detroit, MI, USA, Apr. 10, 2018, doi: 10.4271/2018-01-0565.

[3] T. Eguchi, Y. Sakita, K. Kawagoe, S. Kaneko, K. Mori, and T. Matsumoto, “Development of ‘Super Hicas,’ a new rear wheel steering system with phase-reversal control,” SAE Trans., vol. 98, pp. 1495–1504, 1989.

[4] A. Lucchini, F. P. Azza, M. Corno, S. Formentin, and S. M. Savaresi, “Design and implementation of a MPC-based rear-wheel steering controller for sports cars,” in Proc. IEEE Conf. Control Technol. Appl. (CCTA), 2021, pp. 802–807, doi: 10.1109/CCTA48906.2021.9659248.